

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.04.010

供应商主导下的生鲜农产品供应链定价及 协调模型研究

周欢, 廖思思, 谭辉

(湖南工业大学 商学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对由单个的生鲜供应商、生鲜电商和第三方物流组成的三级供应链, 同时考虑价格和新鲜度对生鲜农产品需求的影响, 研究了生鲜农产品供应链定价及协调问题。首先, 分别构建集中决策下和以生鲜供应商为主导的分散决策下的生鲜农产品供应链定价模型, 并进行对比分析; 其次, 在分散决策的基础上, 采用“收益共享+保鲜成本共担”契约构建协调模型; 最后, 通过算例分析和敏感度分析, 验证了模型得出的结论, 并分析了重要参数对模型的影响。研究发现, 集中式定价决策下的零售价格、保鲜努力水平和供应链利润均优于分散式定价决策的对应值, 在此基础上, 建议采用“收益共享+保鲜成本共担”的契约协调模型, 以使分散式定价决策下的供应链达到协调状态。

关键词: 供应链定价; 供应链协调; 生鲜农产品供应链; 新鲜度; 第三方物流

中图分类号: F253

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)04-0067-10

引文格式: 周欢, 廖思思, 谭辉. 供应商主导下的生鲜农产品供应链定价及协调模型研究[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(4): 67-76.

Research on the Pricing and Coordination Model of Supplier-Dominated Fresh Agricultural Products Supply Chain

ZHOU Huan, LIAO Sisi, TAN Hui

(College of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the three-level supply chain consisting of single fresh supplier, fresh e-commerce and third-party logistics, a research has thus been conducted on the pricing and coordination issues of the fresh agricultural product supply chain, taking into consideration the impact of price and freshness on the demand for fresh agricultural products. First of all, the pricing models are constructed of fresh agricultural products supply chain under centralized decision-making and decentralized decision-making dominated by fresh suppliers, followed by a comparative analysis. Secondly, on the basis of a decentralized decision-making, a coordination model is constructed by using a “revenue sharing plus fresh-keeping cost sharing” contract construction coordination model. Finally, the conclusions drawn by the model can be verified through a case analysis and sensitivity analysis, followed by an analysis of the impact of important parameters on the model. It is found that retail prices, preservation efforts, and supply chain profits under centralized pricing decisions are superior to the corresponding values of decentralized pricing decisions. Based on this, it is recommended to adopt a “profit sharing plus preservation cost sharing” contract coordination model, which helps

收稿日期: 2023-01-30

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目(22C0303)

作者简介: 周欢, 女, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为供应链管理, 智能决策, E-mail: huanzhou@hut.edu.cn

通信作者: 谭辉, 男, 湖南工业大学讲师, 硕士, 主要研究方向为供应链管理, E-mail: 450789986@qq.com

to achieve a coordinated state in the supply chain under decentralized pricing decisions.

Keywords: supply chain pricing; supply chain coordination; supply chain of fresh agricultural products; freshness; third-party logistics

1 研究综述

在互联网越来越发达的时代, 各类电商平台快速发展, 线上购物方式越来越普及, 人们足不出户就可以方便快捷地买到想要的商品。作为生活必需品, 生鲜农产品的线上销售已经变得越来越普遍, 然而, 其市场份额却仍然比较低。一方面, 是由于生鲜农产品易腐易损, 运输过程中必须配备专业的冷链物流设施加大保鲜力度, 从而增加了运输成本; 另一方面, 消费者对于生鲜农产品的新鲜度要求较高, 通过线上购买无法了解生鲜农产品的新鲜度情况, 因而对生鲜电商的信任度不高。为了解决上述问题, 需在控制成本的同时提高消费者的满意度, 对生鲜农产品的价格进行决策, 并协调好供应链主体间的利益关系。可见, 探讨线上生鲜农产品供应链的定价及协调决策, 促进供应链主体提高保鲜努力水平的同时控制保鲜成本, 对推进生鲜农产品的线上销售具有重要意义。

目前, 国内外学者们对生鲜农产品供应链的定价决策展开了广泛研究。A. Herbon^[1]研究了消费者对新鲜度的敏感性具有异质性情况下的动态定价问题。李琳等^[2]针对消费者需求, 对价格和价值的时间敏感性特征, 运用射频识别 (radio frequency identification, RFID) 技术进行灵活定价。张庆等^[3]研究了双方不关注公平、仅供应商关注公平、仅零售商关注公平以及双方同时关注公平的供应链定价策略。随后, Yan B. 等^[4]分别讨论了制造商公平关切和零售商公平关切对生鲜农产品供应链的影响, 得出双方公平关切的行为会降低供应链的整体有效性。闻卉等^[5-6]研究了异质生鲜农产品的定价问题和考虑到消费者的时变效用受农产品的绿色度、销售价格和新鲜度的影响, 研究供应链的定价策略。杨磊等^[7]综合考虑零售商的努力水平和生鲜农产品的变质率, 研究生鲜农产品供应链最优定价策略。He X. M. 等^[8]研究了生鲜农产品供应链中供应商产量有限且零售商存在替代供应商情况下的分销、订货和定价策略。现有研究大多基于线下供应链展开, 而针对线上供应链的研究相对较少。

在供应链协调方面, 供应链协调可以实现各主体

的资源共享, 如何实现供应链协调是学者们一直探索的问题。近年来, 许多学者利用契约来对生鲜农产品供应链进行协调, 以提高供应链绩效和效率。Zheng Q. 等^[9]在考虑零售商实施保鲜努力的基础上设计保鲜成本分担契约和保鲜成本与收益共享契约对供应链进行协调。Yang Q. 等^[10]通过构建 Stackelberg 博弈模型分析了新型 O2O 零售生鲜供应链的运作模式, 比较了不同决策模式下供应链的整体利益, 采用收益共享契约实现供应链协调。王道平等^[11]考虑供应商的保鲜努力水平和运输时间对产品新鲜度的影响, 并构建定价模型, 采用传统成本分担契约和讨价还价下成本分担契约对供应链进行协调。刘墨林等^[12]分析了新鲜度需求弹性和服务需求弹性对决策的影响, 进而设计“收益共享—双向成本分担”契约, 实现供应链协调。Zhou L. N. 等^[13]引入期权契约模型, 在转移不确定需求带来风险的同时帮助供应链实现渠道协调。Liao C. H.^[14]考虑由一个生产商、一个供应商和一个零售商组成的三级生鲜农产品供应链, 探讨零售商是否存在随机现货市场情形下的供应链协调。Li M. 等^[15]分析了物流时空成本和生鲜农产品供应链新鲜度对供应链各利益主体利润的影响, 采用利润共享契约对供应链进行协调。Yan B. 等^[16]认为生鲜农产品供应链的流通效率受消费者购买力影响较大, 提出了一种考虑策略型消费者行为的生鲜农产品供应链协调方法。

此外, 在供应链参与主体方面, 现有研究大多关注的是二级供应链, 即由供应商或者零售商承担保鲜努力水平。如 Feng Y. G. 等^[17]考虑到供应链主体的风险倾向性, 构建了由风险中性供应商和风险规避供应商组成的二级供应链决策模型。Zhao Z. 等^[18]针对单个生产商和单个零售商组成的两级生鲜农产品供应链, 并考虑生鲜农产品容易发生质量和数量损失的情况下, 零售商施加保鲜努力的决策问题。董振宇等^[19]构建了由供应商和零售商组成的二级供应链决策模型, 并对比研究了供应商主导和零售商主导下的均衡决策。

综上所述, 在生鲜农产品供应链定价及协调研究中, 已有文献大多基于线下供应链展开, 考虑了消费

者需求受产品新鲜度等因素的影响,但鲜有研究进一步探讨新鲜度的影响因素。此外,对生鲜农产品供应链的研究集中在二级供应链,即由供应商、零售商或分销商组成的供应链,较少研究第三方物流参与的供应链定价及协调决策。因此,本研究拟以1个生鲜供应商、1个生鲜电商和1个第三方物流(third-party logistics, 3PL)组成的三级生鲜农产品供应链为研究对象,在消费者需求受价格和新鲜度影响的情况下,同时考虑时间和3PL保鲜努力水平对产品新鲜度的影响,构建线上生鲜农产品供应链定价模型,并进行求解,在此基础上,设计“收益共享+保鲜成本共担”契约,以实现供应链协调。

2 问题描述与基本假设

2.1 问题描述

为了方便建立模型并进行求解,本研究中用到的符号及含义说明见表1。

表1 变量的符号及含义

Table 1 Symbols and meanings of variables

变量类型	变量符号	变量含义	
参数	A	生鲜农产品的基本市场需求量	
	C_p	单位产品的生产成本	
	C_t	单位产品的运输成本	
	P_t	单位产品的运输价格	
	θ_0	生鲜农产品的初始新鲜度	
	φ	生鲜农产品的新鲜度衰减值	
	t	生鲜农产品从生鲜供应商至消费者运输时间	
	T	线上生鲜农产品的销售周期	
	u	3PL保鲜努力的成本系数	
	k	新鲜度对保鲜努力水平的敏感系数	
	a	消费者对价格的敏感系数	
	b	消费者对新鲜度的敏感系数	
	决策自变量	P_{wi}	$i=2, 3$, 分别为分散和协调决策下的产品批发价格
		P_{si}	$i=1, 2, 3$, 分别为集中、分散和协调决策下的产品零售价格
e_i		$i=1, 2, 3$, 分别为集中、分散和协调决策下3PL的保鲜努力水平	
决策因变量	D_i	$i=1, 2, 3$, 分别为集中、分散和协调决策下的产品需求量	
	π_{wi}	$i=2, 3$, 分别为分散和协调决策下的生鲜供应商利润	
	π_{ti}	$i=2, 3$, 分别为分散和协调决策下的3PL利润	
	π_{ei}	$i=2, 3$, 分别为分散和协调决策下的生鲜电商利润	
	π_i	$i=1, 2, 3$, 分别为集中、分散和协调决策下整个线上生鲜农产品供应链系统的利润	

在一个生鲜农产品三级供应链系统中,主体是生鲜供应商、生鲜电商和3PL,客体是生鲜农产品。生鲜供应商负责生鲜农产品的采摘和暂时存储,并承担

相应的生产成本;生鲜电商从生鲜供应商处采购产品,并支付批发价格;消费者在生鲜电商平台下单,并支付一定的零售价格后,由3PL负责将产品从生鲜供应商处运送给消费者,并且承担相应的运输成本和运输中的保鲜成本,同时生鲜电商要给3PL支付相应的运输费用。

2.2 基本假设

假设1 供应链中成员均是理性人,在做决策时信息对称,且都追求自身利润最大化。

假设2 供应链中只考虑一种生鲜农产品的销售,且该产品的基本需求量已知,生鲜供应商能够满足基本需求量,即不会发生缺货情况。

假设3 该生鲜农产品在电商平台进行销售的周期为 T ,生鲜农产品从生鲜供应商运送至消费者处的运输时间为 t ,其中 $0 < t < T$ 。

假设4 同时考虑运输时间和保鲜努力水平对新鲜度的影响。首先,在生鲜农产品采摘后的销售周期内,新鲜度会随着时间的流逝而降低,参照但斌等^[20]的研究成果,采用指数形式描述新鲜度随时间衰减特性。在未采取任何保鲜措施的情况下,新鲜度随时间衰减的函数表达式为

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\varphi t}, \quad t \in [0, T]. \quad (1)$$

由于 $\frac{d\theta(t)}{dt} = -\varphi\theta_0 e^{-\varphi t} < 0$,可知产品的新鲜度是

关于时间的单调递减函数,而 $\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \varphi^2\theta_0 e^{-\varphi t} > 0$,

则表明新鲜度衰减的速度是时间的单调递增函数,这与常识相符。因此,可以通过选择适当的保鲜措施来抑制产品的新鲜度降低速度,本研究中参照王磊等^[21]的已有研究成果,假定新鲜度与保鲜努力水平呈线性关系,则可知3PL付出保鲜努力水平后的新鲜度函数表达式为

$$\theta = \theta(t) + ke. \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)中,可得出本研究中生鲜农产品新鲜度的最终表达式为

$$\theta = \theta_0 e^{-\varphi t} + ke. \quad (3)$$

参考文献[22]的研究成果,3PL投入保鲜努力会带来相应的保鲜成本,保鲜成本与保鲜努力水平呈二次函数关系,即3PL付出 e 的保鲜努力水平带来的保鲜成本为

$$C(e) = ue^2/2. \quad (4)$$

假设5 生鲜农产品需求同时受价格和新鲜度的影响,参照H. Gurnani^[23]市场需求函数模型,生鲜农

产品的需求函数可表示为

$$D = A - aP_s + b\theta. \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)中,得到最终的需求函数表达式如下:

$$D = A - aP_s + b(\theta_0 e^{-\rho t} + ke). \quad (6)$$

3 生鲜农产品供应链定价及协调决策模型构建

3.1 集中式定价决策模型

在集中式定价决策下,将生鲜供应商、生鲜电商及3PL当作一个整体看待,决策的最终目标是使供应链系统的利润最大。模型中决策自变量为生鲜电商的产品零售价格和3PL保鲜努力水平,决策因变量为产品需求量和供应链整体利润,供应链整体利润的函数表达式如下:

$$\pi_1 = (P_{s1} - C_p - C_i)D_1 - C(e_1). \quad (7)$$

将式(4)和(6)代入式(7)中,可得

$$\pi_1 = (P_{s1} - C_p - C_i) \left[A - aP_{s1} + b(\theta_0 e^{-\rho t} + ke_1) \right] - \frac{1}{2} u e_1^2. \quad (8)$$

定理1 集中决策下,供应链的最优决策为

$$P_{s1} = \frac{Au + bu\theta_0 e^{-\rho t} + C(au - k^2 b^2)}{2au - k^2 b^2}, \quad (9)$$

$$e_1 = kb(P_{s1} - C)/u, \quad (10)$$

此时的生鲜农产品需求量和供应链整体利润表达式分别如下:

$$D_1 = au(A + b\theta_0 e^{-\rho t} - aC) / (2au - k^2 b^2), \quad (11)$$

$$\pi_1 = u(A + b\theta_0 e^{-\rho t} - aC)^2 / [2(2au - k^2 b^2)]. \quad (12)$$

证明 为方便计算,令 $C = C_p + C_i$, 则总体利润函数 $\pi_1 = (P_{s1} - C) \left[A - aP_{s1} + b(\theta_0 e^{-\rho t} + ke_1) \right] - \frac{1}{2} u e_1^2$ 。在集中决策下,对 π_1 关于 P_{s1} 和 e_1 求一阶和二阶偏导,得到 π_1 关于 P_{s1} 和 e_1 的海瑟矩阵为 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -2a & kb \\ kb & -u \end{bmatrix}$, 因

为其一阶主子式 $-2a < 0$, 所以当二阶主子式 $\begin{vmatrix} -2a & kb \\ kb & -u \end{vmatrix} =$

$2au - k^2 b^2 > 0$ 时,该海瑟矩阵为负定矩阵,这时 π_1 是关于 P_{s1} 和 e_1 的凹函数,则存在最优 P_{s1} 和 e_1 , 使得 π_1 最大。

令 $\frac{\partial \pi_1}{\partial P_{s1}} = 0$, 可得 P_{s1} 与 e_1 的关系表达式如下:

$$P_{s1} = (A + b\theta_0 e^{-\rho t} + kbe_1 + aC) / (2au - k^2 b^2), \quad (13)$$

$$e_1 = kb(P_{s1} - C) / u. \quad (14)$$

联立式(13)和(14),可得供应链的最优决策。将式(13)(14)代入式(6)(7)中,可得生鲜农产品的需求量和供应链的整体利润,定理1证毕。

3.2 分散式定价决策模型

在分散式定价决策下,供应链成员做决策时都只追求自身获利达最大值。本文研究以生鲜供应商为主导者、生鲜电商和3PL为追随者的博弈。即在博弈过程中,供应商作为生鲜农产品供应链的主导者,掌握更多的决策权。先由供应商制定产品的批发价格,然后3PL和生鲜电商根据供应商的选择做出自己的决策。具体的博弈过程如下:第一步,供应商考虑到现有产品的供应量和需求量,并结合以往经验,采用利润最大化原则,制定生鲜农产品的批发价格 P_{w2} ; 第二步,3PL也以利润最大化为目标,制定最优保鲜努力水平 e_2 ; 第三步,生鲜电商在生鲜供应商制定的批发价格和3PL制定的保鲜努力水平基础上,以利润最大化为目标进行决策,得出最优零售价格 P_{s2} 。生鲜供应商、3PL、生鲜电商的利润函数分别如下:

$$\pi_{s2} = (P_{w2} - C_p)D_2 = (P_{w2} - C_p) \left[A - aP_{s2} + b(\theta_0 e^{-\rho t} + ke_2) \right], \quad (15)$$

$$\pi_{12} = (P_t - C_i)D_2 = (P_t - C_i) \left[A - aP_{s2} + b(\theta_0 e^{-\rho t} + ke_2) \right], \quad (16)$$

$$\pi_{e2} = (P_{s2} - P_{w2} - P_t)D_2 = (P_{s2} - P_{w2} - P_t) \left[A - aP_{s2} + b(\theta_0 e^{-\rho t} + ke_2) \right]. \quad (17)$$

定理2 在供应商主导的分散决策下,生鲜供应商、生鲜电商和3PL的最优决策表达式如下:

$$P_{w2} = \left\{ 2u \left[A + b\theta_0 e^{-\rho t} - a(P_t - C_p) \right] + k^2 b^2 (P_t - C_i) \right\} / (4au), \quad (18)$$

$$P_{s2} = \frac{2u \left[3A + 3b\theta_0 e^{-\rho t} + a(P_t + C_p) \right] + 3k^2 b^2 (P_t - C_i)}{8au}, \quad (19)$$

$$e_2 = (P_t - C_i)kb / (2u). \quad (20)$$

此时生鲜农产品的需求量和供应链各成员的利润分别如下:

$$D_2 = \frac{2u \left[A + b\theta_0 e^{-\rho t} - a(P_t + C_p) \right] + k^2 b^2 (P_t - C_i)}{8u}, \quad (21)$$

$$\pi_{s_2} = \frac{\{2u[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t + C_p)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)\}^2}{32au^2}, \quad (22)$$

$$\pi_{i_2} = (P_t - C_t)[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t + C_p)]/4, \quad (23)$$

$$\pi_{e_2} = \{2u[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t + C_p)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)\}^2 / 64au^2. \quad (24)$$

证明 基于以上博弈过程, 此处采用逆序方法进行求解, 应该先求生鲜电商的最优决策, 其次是3PL的最优决策, 最后求生鲜供应商的最优决策。

1) 在式(17)中, 求 π_{e_2} 关于 P_{s_2} 的一阶导数及二阶导数, 有

$$\frac{d\pi_{e_2}}{dP_{s_2}} = A - aP_{s_2} + b(\theta_0 e^{-\theta t} + ke_2) + a(P_{w_2} + P_t),$$

$$\frac{d^2\pi_{e_2}}{dP_{s_2}^2} = -2a < 0.$$

这说明 π_{e_2} 是关于 P_{s_2} 的凹函数, 即存在最优 P_{s_2} 使得 π_{e_2} 达最大值。令 $\frac{d\pi_{e_2}}{dP_{s_2}} = 0$, 可得零售价格 P_{s_2} 与批发价格 P_{w_2} 、保鲜努力水平 e_2 的关系式如下:

$$P_{s_2} = [A + b\theta_0 e^{-\theta t} + kbe_2 + a(P_{w_2} + P_t)]/2a, \quad (25)$$

将式(25)代入式(16)中, 得

$$\pi_{i_2} = (P_t - C_t) \frac{A + b\theta_0 e^{-\theta t} + kbe_2 + a(P_{w_2} + P_t)}{2a} - \frac{1}{2}ue_2^2. \quad (26)$$

2) 同理, 在式(26)中, 求 π_{i_2} 关于 e_2 的一阶导数

及二阶导数, 有

$$\frac{d\pi_{i_2}}{de_2} = \frac{(P_t - C_t)kb}{2} - ue_2, \quad \frac{d^2\pi_{i_2}}{de_2^2} = -u < 0.$$

这说明 π_{i_2} 是关于 e_2 的凹函数, 即存在最优 e_2 使得 π_{i_2} 达最大值。令 $\frac{d\pi_{i_2}}{de_2} = 0$, 可得最优保鲜努力水平 e_2 。将 e_2 代入式(15)中, 可得

$$\pi_{s_2} = (P_{w_2} - C_p)2u\{[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_{w_2} + P_t)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)\} / 4u. \quad (27)$$

3) 同理, 在式(27)中, 求 π_{s_2} 关于 P_{w_2} 的一阶导数及二阶导数, 有

$$\frac{d\pi_{s_2}}{dP_{w_2}} = \frac{2u[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t - C_p)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)}{4u}$$

$$aP_{w_2}, \quad \frac{d^2\pi_{s_2}}{dP_{w_2}^2} = -a < 0.$$

这说明 π_{s_2} 是关于 P_{w_2} 的凹函数, 即存在最优解 P_{w_2} 使得 π_{s_2} 达最大值。令 $\frac{d\pi_{s_2}}{dP_{w_2}} = 0$, 可得最优批发价格

P_{w_2} 。将式(27)和 P_{w_2} 代入式(25)中, 可得最优生鲜农产品零售价格 P_{s_2} 。将 e_2 和 P_{s_2} 代入式(6)中, 可得到生鲜农产品的最优需求量, 将 e_2 、 P_{w_2} 和 P_{s_2} 分别代入式(15)~(17)中, 可得到生鲜供应商、3PL 和生鲜电商的最优利润, 定理2证毕。

3.3 集中式定价决策和分散式定价决策比较分析

集中式定价决策和分散式定价决策下各决策变量的表达式见表2。

表2 集中式定价决策和分散式定价决策下各决策变量表达式

Table 2 Expressions of various decision variables under centralized and decentralized pricing decisions

决策变量	集中式定价决策	分散式定价决策
生鲜电商零售价格 P_s	$[Au + bu\theta_0 e^{-\theta t} + C(au - k^2 b^2)] / (2au - k^2 b^2)$	$\{2u[3A + 3b\theta_0 e^{-\theta t} + a(P_t + C_p)] + 3k^2 b^2 (P_t - C_t)\} / (8au)$
生鲜供应商批发价格 P_w		$\{2u[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t - C_p)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)\} / (4au)$
第三方物流保鲜努力水平 e	$kb(A + b\theta_0 e^{-\theta t} - aC) / (2au - k^2 b^2)$	$(P_t - C_t)kb / (2u)$
线上生鲜农产品需求量 D	$au(A + b\theta_0 e^{-\theta t} - aC) / (2au - k^2 b^2)$	$\{2u[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t + C_p)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)\} / (8u)$
生鲜供应商利润 π_s		$\{2u[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t + C_p)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)\}^2 / (32au^2)$
第三方物流服务商利润 π_l		$(P_t - C_t)[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t + C_p)] / 4$
生鲜电商利润 π_e		$\{2u[A + b\theta_0 e^{-\theta t} - a(P_t + C_p)] + k^2 b^2 (P_t - C_t)\}^2 / (64au^2)$
供应商整体利润 π	$u(A + b\theta_0 e^{-\theta t} - aC)^2 / (2(2au - k^2 b^2))$	$\pi_2 = \pi_{s_2} + \pi_{i_2} + \pi_{e_2}$

供应链能够正常运行的前提是其利润大于0, 则可得 $P_s > C_p + C_t$ 。又因为供应链成员参与的前提是有利可图, 则单位批发价格要大于单位生产成本, 单位运输价格要大于单位运输成本, 单位零售价格要大于单位批发价格与单位运输价格之和, 即 $P_w > C_p$, $P_t > C_t$, $P_s > P_w + P_t$, 进而得到 $P_s > C_p + P_t$, $P_s - C_p - C_t > P_t - C_t$ 。然后通过比较式(14)和(20), 得到 $e_1 > e_2$ 。进一步比较两种决策下的需求量和利润, 可得集中决策下生鲜农产品的需求量和供应链整体利润要优于分散决策, 即 $D_1 > D_2$, $\pi_1 > \pi_2$ 。

3.4 协调策略模型

由对比结果可以得知, 在集中式定价决策的情况下, 供应链的零售价格、保鲜努力水平和利润都要优于分散式定价决策下的零售价格、保鲜努力水平和利润。这是因为在分散式定价决策下, 供应链中的每个成员都以追求自己的利益最大为目的, 即零售商为了增加收入会抬高零售价格, 3PL 为了降低保鲜成本而不愿意贡献较高的保鲜努力, 使得保鲜效果不佳, 两者都会导致生鲜农产品需求量下降, 从而使供应链的利润下降。因此, 本小节在以供应商为主导者的分散式定价决策基础上, 采用“收益共享+保鲜成本共担”契约建立一种供应链协调模型。协调模型具体工作过程如下: 生鲜供应商以较低的批发价格将农产品批发给生鲜电商, 然后生鲜电商将比例为 β 的收益分享给生鲜供应商, 同时 3PL 增加保鲜努力水平, 生鲜电商承担比例为 γ 的保鲜成本。

在该契约情况下, 生鲜农产品供应商、3PL、生鲜电商的利润表达式如下:

$$\pi_{s3} = (P_{w3} - C_p + \beta P_{s3})D_3 = (P_{w3} - C_p + \beta P_{s3})[A - aP_{s3} + b(\theta_0 e^{-\varphi t} + ke_3)], \quad (28)$$

$$\pi_{13} = (P_{w3} - C_t)D_3 - \frac{1}{2}(1-\gamma)ue_3^2 = (P_{w3} - C_t)[A - aP_{s3} + b(\theta_0 e^{-\varphi t} + ke_3)] - \frac{1}{2}(1-\gamma)ue_3^2, \quad (29)$$

$$\pi_{e3} = [(1-\beta)P_{s3} - P_{w3} - P_t]D_3 - \frac{1}{2}\gamma ue_3^2 = [(1-\beta)P_{s3} - P_{w3} - P_t][A - aP_{s3} + b(\theta_0 e^{-\varphi t} + ke_3)] - \frac{1}{2}\gamma ue_3^2. \quad (30)$$

与分散式定价决策下的求解方法类似, 采用逆序方法求解“收益共享+保鲜成本共担”契约协调模型下各决策变量的最优表达式及供应链的利润。

式(30)中, 求 π_{e3} 关于 P_{s3} 的一阶导数和二阶导数, 有

$$\frac{d\pi_{e3}}{dP_{s3}} = (1-\beta)(A - 2aP_{s3} + b(\theta_0 e^{-\varphi t} + ke_3)) + a(P_{w3} + P_t),$$

$$\frac{d^2\pi_{e3}}{dP_{s3}^2} = -2a(1-\beta) < 0,$$

这说明 π_{e3} 是关于 P_{s3} 的凹函数, 即存在最优的 P_{s3} ,

使得 π_{e3} 达最大值。令 $\frac{d\pi_{e3}}{dP_{s3}} = 0$, 可得:

$$P_{s3} = \frac{(1-\beta)(A + b\theta_0 e^{-\varphi t} + ke_3) + a(P_{w3} + P_t)}{2a(1-\beta)}. \quad (31)$$

将式(31)代入式(29)中, 再求 π_{13} 关于 e_3 的一阶导数及二阶导数, 有

$$\frac{d\pi_{13}}{de_3} = \frac{(P_t - C_t)kb}{2} - (1-\gamma)ue_3, \quad \frac{d^2\pi_{13}}{de_3^2} = -u(1-\gamma) < 0,$$

这说明 π_{13} 是关于 e_3 的凹函数, 即存在最优 e_3 使得

π_{13} 达最大值。令 $\frac{d\pi_{13}}{de_3} = 0$, 可得最优保鲜努力水平表达式如下:

$$e_3 = (P_t - C_t)kb/2u(1-\gamma). \quad (32)$$

由 $P_{s3} = P_{s1}$, 可得 P_{w3} 与 β 的关系式如下:

$$P_{w3} = (1-\beta)(C_p + C_t) - P_t. \quad (33)$$

因为 $P_{w3} > 0$, 可得收益分享比例 β 的取值范围为

$$0 < \beta < (C_p + C_t - P_t)/(C_p + C_t), \quad (34)$$

再由 $e_3 = e_1$, 可得保鲜成本共担比例 γ 的表达式为

$$\gamma = 1 - \frac{(2au - k^2b^2)(P_t - C_t)}{2u(A + b\theta_0 e^{-\varphi t} - a(C_p + C_t))}. \quad (35)$$

当模型参数都符合上述条件的情况下, 整个供应链可以处于协调状态。此时契约作用下的供应链利润、产品零售价格和 3PL 的保鲜努力水平均可以达到集中决策下的水平。而要让契约发挥作用, 还要满足在契约协调作用下, 各成员自身利润要高于分散式定价决策利润, 可以通过设置合理的参数使协调契约下的供应链达到最优状态。

4 算例及敏感度分析

4.1 算例分析

参考已有文献并结合现实情况, 运用算例对以上模型进行分析, 各参数赋值如表 3 所示。

表 3 参数赋值表

Table 3 Parameter assignment table

参数	A	a	b	C_p	C_t	P_t	θ_0	φ	t	k	u
取值	200	3	5	10	5	8	1	0.2	2	0.2	200

将上述取值分别代入集中式定价决策、分散式定价决策和契约协调决策下的定价模型中,得到各决策变量数值如表4所示。

表4 不同决策结果对比

Table 4 Comparison of different decision results

决策变量	集中式定价决策	分散式定价决策	契约协调决策
P_w		34.893	1.000
P_s	41.414	55.340	41.414
e	0.132	0.008	0.132
D	79.242	37.340	79.242
π_s		929.506	599.510
π_1		112.014	237.626
π_c		464.753	1 254.208
π	2 091.345	1 506.273	2 091.345

4.1.1 集中式和分散式定价决策下各决策变量比较

由表4可知:

1) 集中式定价决策下的保鲜努力水平为0.132,分散式定价决策下的保鲜努力水平为0.008,可见集中式定价决策下的保鲜努力水平高于分散式定价决策的对应值。这是因为集中式定价决策下各成员优先考虑供应链的整体利润,3PL作为其中的一份子,会尽可能贡献较高的保鲜努力水平来维持产品的新鲜度;而在分散式定价决策下,3PL提高保鲜努力水平获得的收益不及为此付出的成本,所以3PL只会贡献使自己利润达到最大的保鲜努力水平。

2) 集中式定价决策下的零售价格为41.414,分散式定价决策下的零售价格为55.340,集中式定价决策下的零售价格低于分散式定价决策下的对应值。这是因为集中式定价决策下生鲜电商将供应链的利益放在第一位,尽管提高零售价格可能会增加单位产品的收益,但同时会造成需求量流失,所以生鲜电商会制定一个最优的价格,以使得单位产品利润与需求量的乘积达最大。

3) 集中式定价决策下的需求量为79.242,分散式定价决策下的需求量为37.340,表明集中式定价决策下的需求量高于分散式定价决策的需求量。需求量是由零售价格和保鲜努力水平共同决定的,由于集中式定价决策下的零售价格比分散式定价决策的低,保鲜努力水平比分散式定价决策的高,显然其需求量比分散式定价决策的要高。

4) 集中式定价决策下的利润为2 091.345,分散式定价决策下的利润为1 506.273,集中式定价决策下的利润高于分散式定价决策。在单位成本固定的情况下,利润是由需求量和价格共同决定的。与分散式定价决策相比,虽然集中式定价决策下的零售价格更低,但其需求量是分散式定价决策下需求量的两倍以

上,因此集中式定价决策下的利润会高于分散式定价决策的利润。

4.1.2 契约协调决策各决策变量与集中式、分散式定价决策比较

由表4可知:

1) 集中式定价决策、分散式定价决策、契约协调决策下的利润分别为2 091.345, 1 506.273, 2 091.345,可见在契约的协调作用下,供应链的整体利润要优于无契约的分散式定价决策的利润,并且达到了集中式定价决策下的供应链整体利润水平。

2) 生鲜供应商、3PL、生鲜电商在分散式定价决策下的利润分别为929.506, 112.014, 464.753,在契约协调决策下的利润分别为599.510, 237.626, 1 254.208,表明契约协调作用下的3PL和生鲜电商的利润都要优于无契约分散式定价决策的利润,但是生鲜供应商的利润要低于无契约分散式定价决策的利润。生鲜电商通过与生鲜供应商收益共享获取较低的批发价格,进而降低零售价格,同时通过分担保鲜成本促进3PL提高保鲜努力水平,二者都会增加生鲜农产品的需求量,从而使得生鲜电商和3PL的利润提高。然而,由于当生鲜供应商与生鲜电商达成收益共享时,生鲜供应商以一个远低于生产成本的批发价格将产品批发给生鲜电商,因此生鲜供应商从生鲜电商处获得的部分收益不足以弥补批发价格过低带来的亏损。

4.2 敏感度分析

由算例分析结果可以得知,产品的零售价格和新鲜度会影响市场对该产品的需求量及利润,因此本节对模型中消费者价格敏感系数和消费者新鲜度敏感系数进行敏感度分析,探讨这两个参数对模型的影响程度。

4.2.1 消费者价格敏感系数的敏感性分析

假设其他参数不变(参数取值见表3),以价格敏感系数 a 为变量,讨论其变化对各决策变量及利润的影响。参考其他文献并结合实际情况, a 取值为1~9,得到各决策变量及利润随 a 变化的曲线,如图1所示。由图1可知,无论是在集中式定价决策下,还是在供应商主导的分散式定价决策下,生鲜农产品的零售价格、保鲜努力水平、需求量、供应链整体利润都会随消费者价格敏感系数 a 的增加而减少。此外,分散式定价决策下生鲜农产品的批发价格和各成员自身利润也会随 a 的增加而减少。

在集中式定价决策下,随着消费者价格敏感系数扩大,消费者对价格的敏感程度上升,为了吸引消费者,供应链整体做出降低零售价格的决策,同时为了

保证利润而降低保鲜努力水平。在分散式定价决策下，同样生鲜电商为了刺激消费，往往会制定较低的零售价格。此时，生鲜电商为了维持自己的利润，会压低生鲜供应商的批发价格和 3PL 的运输价格，

故 3PL 也不愿付出过多成本而减少保鲜努力水平。因此，上述两种决策下的生鲜农产品质量都会下降，消费者需求量也会下降，集中式定价决策下供应链整体利润和分散式定价决策下各成员利润都会减少。

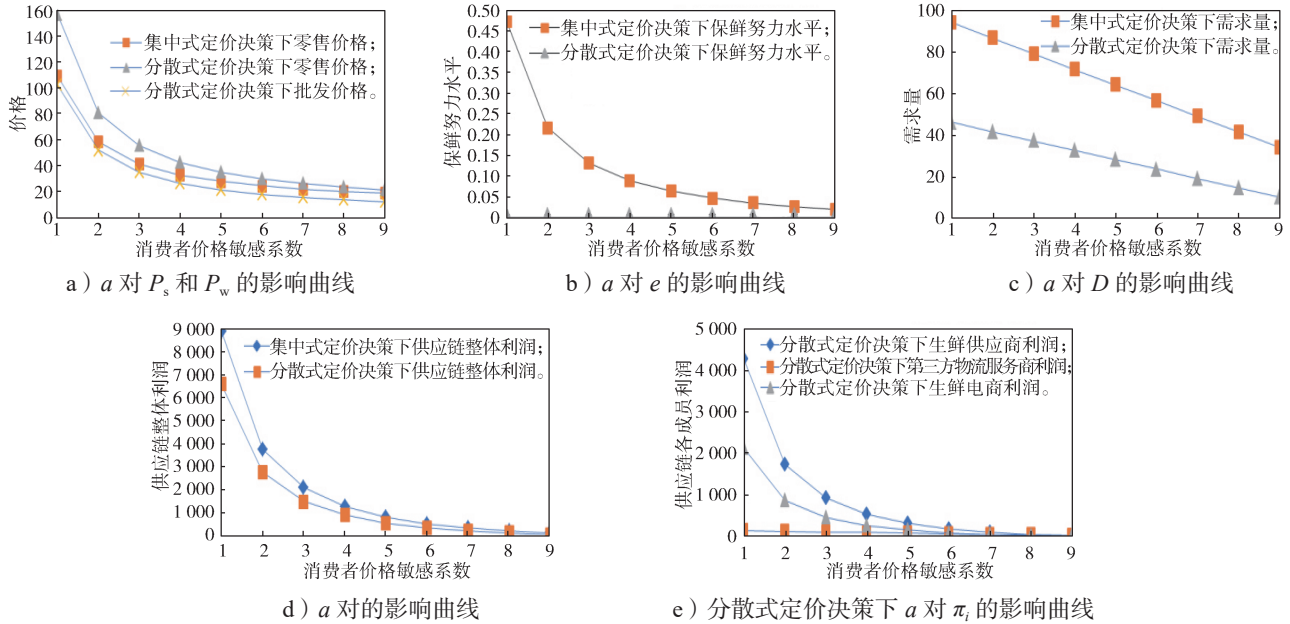


图 1 各决策变量及利润随 a 变化关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between decision variable and profits changing with a

4.2.2 消费者新鲜度敏感系数的敏感性分析

假设其他参数不变 (具体见表 3)，以新鲜度敏感系数 b 为变量，讨论 b 的变化对各决策变量及利

润的影响。参考其他文献并且结合实际情况，确定 b 的取值为 1~9，得到各决策变量及利润随 b 变化的关系曲线，如图 2 所示。

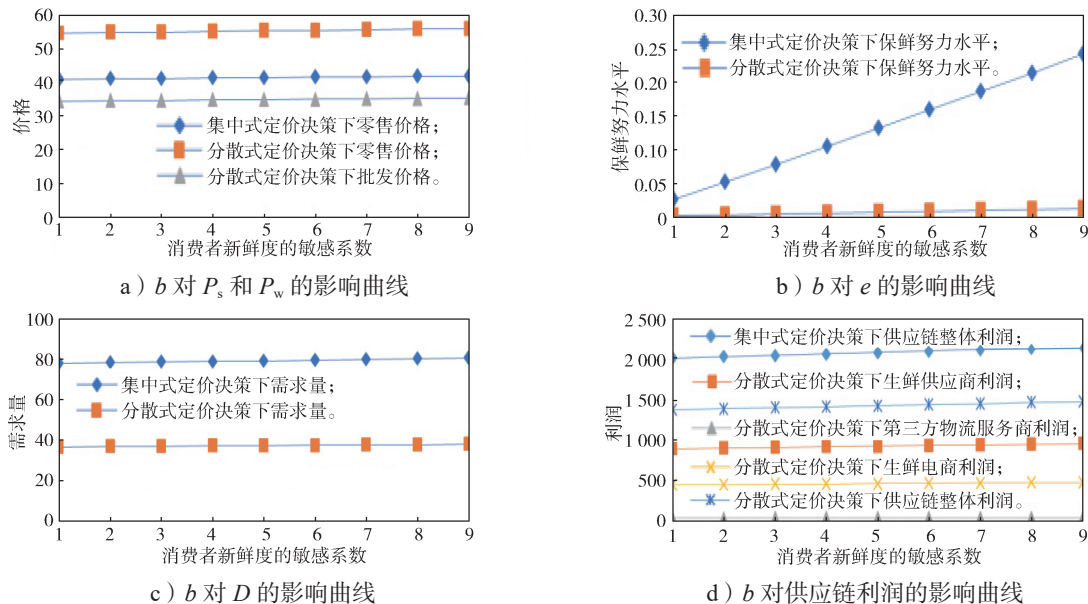


图 2 各决策变量及利润随 b 变化关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between decision variable and profits changing with b

由图 2 可知，新鲜度敏感系数的变化对生鲜农产品的零售价格、批发价格、需求量、供应链整体利润、分散式定价决策下各成员的利润、分散式定价决策下保鲜努力水平的影响都不显著，但对集中式定价决策

下的保鲜努力水平的影响比较显著。由于新鲜度对保鲜努力水平的敏感系数 k 非常小，在分散式定价决策下，3PL 提高保鲜努力水平对新鲜度并没有明显的改善，从而对需求量、利润等的影响非常小，即使消费

者对新鲜度的敏感系数较高, 3PL 也不会付出较高的保鲜努力水平。而在集中式定价决策下, 提高保鲜努力水平所带来的利润要大于付出的成本, 因此随着消费者新鲜度敏感系数扩大, 供应链成员会选择提高保鲜努力水平。

5 结论与建议

随着电子商务和冷链物流不断发展, 网购成为人们获取生鲜农产品的重要渠道。然而生鲜农产品易腐烂的特性使其保鲜成本过高, 降低了消费者对生鲜电商的信任度, 进而影响其线上市场份额。在此背景下, 本文针对由单个生鲜供应商、单个生鲜电商和单个 3PL 组成的三级生鲜农产品供应链, 在消费者需求受价格和新鲜度影响的情况下, 同时考虑时间和 3PL 保鲜努力水平对产品新鲜度的影响, 对生鲜农产品供应链的定价与协调进行了研究。研究发现:

1) 在没有采取任何措施对供应链进行协调时, 集中式定价决策下的零售价格低于分散式定价决策, 保鲜努力水平和供应链整体利润均高于分散式定价决策的对应值, 因零售价格的负向作用和保鲜努力水平的正向作用, 集中式定价决策下的需求量高于分散式定价决策的需求量。

2) 相比于无契约下的分散式定价决策, 采用“收益共享+保鲜成本共担”契约可以在降低产品零售价格的同时, 提高 3PL 保鲜努力水平和生鲜农产品需求量, 使供应商整体利润达到集中式定价决策下的利润水平。

3) 无论是集中式定价决策还是供应商主导下的分散式定价决策下, 消费者价格敏感系数的增加会显著降低生鲜农产品的零售价格、保鲜努力水平、需求量和供应链的整体利润。

4) 消费者新鲜度价格敏感系数的增加对生鲜农产品的零售价格、供应链的整体利润等影响不显著, 但会明显提高集中式定价决策下的保鲜努力水平。

为促进生鲜农产品供应链的协调发展, 提高供应链的整体收益水平, 本文提出以下建议:

1) 采取集中决策, 协调供应链成员之间的利益冲突。通过前面对集中式定价决策和分散式定价决策下生鲜农产品供应链模型的分析, 发现分散式定价决策下, 供应链各成员都以自身利益最大化为目标进行决策, 都希望其他成员能够为提高供应链整体效益而努力。而集中式定价决策下, 供应链成员都从供应链利益整体出发作出自己的决策, 从而使得在提高供应链整体利润的同时也能使自身利益最大。

2) 建立激励机制促进供应链成员付出更多的努

力。供应链成员付出努力会产生相应成本, 而其他成员可以从中获益, 因此为解决这种冲突问题, 需要采取激励机制促进供应链成员付出更多的努力。在生鲜农产品供应链中, 对生鲜农产品进行保鲜来提高产品质量尤为重要。通过“收益共享+保鲜成本共担”契约可以使得 3PL 付出更多保鲜努力水平的同时获得相应的收益, 因此 3PL 愿意为此努力。

本文研究的是单个生鲜供应商、单个生鲜电商和单个 3PL 组成的三级生鲜农产品供应链的博弈模型, 还存在一定的局限性, 未来将进一步从以下方面进行研究: 1) 供应链节点仅涉及单个成员, 而在现实情况下, 往往有多个生鲜供应商或多个生鲜电商同时参与决策, 因此下一步可研究单个节点多成员参与的定价决策问题; 2) 本文只采用了“收益共享+保鲜成本共担”一种契约对供应链进行协调, 协调结果缺乏对比性, 因此下一步可选取多种协调契约并对不同契约条件下的决策结果进行比较, 得出最优协调契约。

参考文献:

- [1] HERBON A. Optimal Piecewise-Constant Price Under Heterogeneous Sensitivity to Product Freshness[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(2): 365-385.
- [2] 李琳, 范体军. 零售商主导下生鲜农产品供应链的定价策略对比研究[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(12): 113-123.
LI Lin, FAN Tijun. Comparison and Analysis on Pricing Policies for Fresh Agricultural Produce Supply Chain with Dominant Retailer[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(12): 113-123.
- [3] 张庆, 张旭. 不同公平关切行为下的生鲜农产品供应链定价策略[J]. *系统工程*, 2016, 34(9): 89-96.
ZHANG Qing, ZHANG Xu. Pricing Strategy of Fresh Agricultural Supply Chain Under Different Behaviors of Fairness Concerns[J]. *Systems Engineering*, 2016, 34(9): 89-96.
- [4] YAN B, CHEN Y R, HE S Y. Decision Making and Coordination of Fresh Agriculture Product Supply Chain Considering Fairness Concerns[J]. *RAIRO - Operations Research*, 2020, 54(4): 1231-1248.
- [5] 闻卉, 陶建平, 曹晓刚. 异质性生鲜农产品供应链的差别定价与协调策略[J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(16): 8-17.
WEN Hui, TAO Jianping, CAO Xiaogang. Differentiation Pricing and Coordination Policy of Heterogeneous Fresh Agricultural Products Supply Chain[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(16): 8-17.

- [6] 闻卉, 许明辉, 陶建平. 考虑绿色度的生鲜农产品供应链的销售模式与定价策略[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(5): 495-504.
WEN Hui, XU Minghui, TAO Jianping. Sales Mode Selection and Pricing Strategies for Green Degree Concerned Fresh Agricultural Products Supply Chain[J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition), 2020, 66(5): 495-504.
- [7] 杨磊, 肖小翠, 张智勇. 需求依赖努力水平的生鲜农产品供应链最优定价策略[J]. 系统管理学报, 2017, 26(1): 142-153.
YANG Lei, XIAO Xiaocui, ZHANG Zhiyong. Optimal Pricing Policies of Fresh Agricultural Product Supply Chain with Effort Level Dependent Demand[J]. Journal of Systems & Management, 2017, 26(1): 142-153.
- [8] HE X M, ZHANG C, GUO X T. Pricing and Distribution Strategies of Fresh Agricultural Product Supply Chain Considering Substitutes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-15.
- [9] ZHENG Q, IEROMONACHOU P, FAN T J, et al. Supply Chain Contracting Coordination for Fresh Products with Fresh-Keeping Effort[J]. Industrial Management & Data Systems, 2017, 117(3): 538-559.
- [10] YANG Q, XIONG L, LI Y F, et al. Contract Coordination of Fresh Agri-Product Supply Chain Under O2O Model[J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8771.
- [11] 王道平, 朱梦影, 王婷婷. 生鲜供应链保鲜努力成本分担契约研究[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2): 36-43.
WANG Daoping, ZHU Mengying, WANG Tingting. Research on the Cost Sharing Contract of Fresh-Product Supply Chain's Fresh-Keeping Efforts[J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25(2): 36-43.
- [12] 刘墨林, 但斌, 马崧萱. 考虑保鲜努力与增值服务的生鲜电商供应链最优决策与协调[J]. 中国管理科学, 2020, 28(8): 76-88.
LIU Molin, DAN Bin, MA Songxuan. Optimal Strategies and Coordination of Fresh E-Commerce Supply Chain Considering Freshness-Keeping Effort and Value-Added Service[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(8): 76-88.
- [13] ZHOU L N, ZHOU G G, QI F Z, et al. Research on Coordination Mechanism for Fresh Agri-Food Supply Chain with Option Contracts[J]. Kybernetes, 2019, 48(5): 1134-1156.
- [14] LIAO C H, LU Q H. Coordinating a Three-Level Fresh Agricultural Product Supply Chain Considering Option Contract Under Spot Price Uncertainty[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022, 2022: 1-19.
- [15] LI M, HE L N, YANG G C, et al. Profit-Sharing Contracts for Fresh Agricultural Products Supply Chain Considering Spatio-Temporal Costs[J]. Sustainability, 2022, 14(4): 2315.
- [16] YAN B, CHEN X X, CAI C Y, et al. Supply Chain Coordination of Fresh Agricultural Products Based on Consumer Behavior[J]. Computers & Operations Research, 2020, 123: 105038.
- [17] FENG Y G, HU Y, HE L. Research on Coordination of Fresh Agricultural Product Supply Chain Considering Fresh-Keeping Effort Level Under Retailer Risk Avoidance[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021, 2021: 1-15.
- [18] ZHAO Z, CHENG Y. Two-Stage Decision Model of Fresh Agricultural Products Supply Chain Based on Option Contract[J]. IEEE Access, 2022, 10: 119777-119795.
- [19] 董振宁, 周雪君, 林强. 考虑保鲜努力的生鲜农产品供应链协调[J]. 系统工程学报, 2022, 37(3): 362-374.
DONG Zhenning, ZHOU Xuejun, LIN Qiang. Coordination of Fresh Products Supply Chain with Freshness-Keeping Effort[J]. Journal of Systems Engineering, 2022, 37(3): 362-374.
- [20] 但斌, 王磊, 李宇雨. 考虑消费者效用与保鲜的生鲜农产品EOQ模型[J]. 中国管理科学, 2011, 19(1): 100-108.
DAN Bin, WANG Lei, LI Yuyu. An EOQ Model for Fresh Agricultural Product Considering Customer Utility and Fresh-Keeping[J]. Chinese Journal of Management Science, 2011, 19(1): 100-108.
- [21] 王磊, 但斌. 考虑消费者效用的生鲜农产品供应链保鲜激励机制研究[J]. 管理工程学报, 2015, 29(1): 200-206.
WANG Lei, DAN Bin. The Incentive Mechanism for Preservation in Fresh Agricultural Supply Chain Considering Consumer Utility[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(1): 200-206.
- [22] HA A Y, TONG S L, ZHANG H T. Sharing Demand Information in Competing Supply Chains with Production Diseconomies[J]. Management Science, 2011, 57(3): 566-581.
- [23] GURNANI H, ERKOC M. Supply Contracts in Manufacturer-Retailer Interactions with Manufacturer-Quality and Retailer Effort-Induced Demand: Supply Contracts in Manufacturer-Retailer Interactions[J]. Naval Research Logistics (NRL), 2008, 55(3): 200-217.

(责任编辑: 廖友媛)